

Braunschweigische  
Wissenschaftliche Gesellschaft

# Jahrbuch 2018

Sonderdruck  
Seiten 97–103



J. CRAMER Verlag • Braunschweig  
2019

## **Aus Anorganik wird Organik — die Bildung einfacher organischer Verbindungen mittels abiotischer Synthese\***

HELGE MIßBACH

Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen, Geobiologie,  
Goldschmidtstraße 3, DE- 37077 Göttingen

Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Justus-von-Liebig-Weg 3,  
DE-37077 Göttingen, Email: hmissba@gwdg.de

Woher kommen die essentiellen organischen Moleküle, die eine Entstehung des Lebens auf der Erde möglich machten? Bei der Beantwortung dieser Frage stößt man automatisch auf den Prozess der abiotischen Synthese, das zentrale Thema des oben genannten Vortrags. Im ersten Teil dieses Vortrags wurde im Wesentlichen ein grober Einblick in unterschiedliche Formen der abiotischen Synthese gegeben. Der zweite Teil fokussierte auf Studien zur abiotischen Synthese am Geowissenschaftlichen Zentrum Göttingen sowie ihre Anwendung bei der Suche nach (frühem) Leben auf der Erde und dem Mars.

### **1. Abiotische Synthese – ein kurzer Überblick**

Abiotische Synthesereaktionen sind eine Quelle relativ einfacher organischer Moleküle und könnten somit Grundbausteine für die Entstehung des Lebens auf der Erde (oder anderswo in unserem Sonnensystem) geliefert haben (Bada, 2004, Follmann & Brownson 2009). Grundsätzlich kann man dabei zwischen exogener und endogener abiotischer Synthese unterscheiden.

Die exogene abiotische Synthese beschreibt die Entstehung und chemische Evolution organischer Moleküle im All. Durch Nukleosynthese entstehen in Sternen die bioessentiellen Elemente (C, H, N, O, P, S), aus denen sich kleinere Moleküle bilden können. Im interstellaren Medium werden diese durch UV-Strahlung, kosmische Strahlung und Reaktionen auf Staub- und Eisoberflächen verändert. Wichtig für die Entstehung komplexerer organischer Moleküle sind dabei vor allem die dichten Molekularwolken, da die Interaktion zwischen einzelnen kleineren Molekülen hier besonders groß ist (Ehrenfreund & Charnley 2000, Ruf et al. 2018).

---

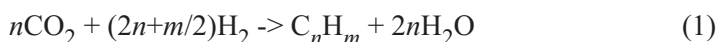
\* Der Vortrag wurde am 12.10.2018 vor der gemeinsamen Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft und der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen gehalten.

Die organischen Moleküle aus den Anfängen unseres Sonnensystems lassen sich heute noch in Kometen und Meteoriten nachweisen. So brachte zuletzt die Untersuchung des Kometen Churyumov-Gerasimenko durch die Rosetta Raumsonde und ihr Landemodul Philae neue Erkenntnisse über die Ur-Zusammensetzung unseres Sonnensystems, zum Beispiel durch die Entdeckung von Aceton, Glycin und Phosphor auf der Kometenoberfläche und in der Koma (Goesmann et al., 2015; Altwegg et al., 2016). Es wird vermutet, dass zumindest ein Teil der für die Entstehung des Lebens wichtigen organischen Moleküle durch Meteoriten und Kometen auf die frühe Erde gelangt sind. Somit könnten diese einen Anteil an der frühen chemischen Evolution auf der Erde gehabt haben (Chyba & Sagan 1992, Dass et al. 2016).

Die endogene abiotische Synthese beschreibt Prozesse, die direkt auf der Erde ablaufen, zum Beispiel in der Atmosphäre. 1953 veröffentlichte Stanley Miller dazu die ersten Ergebnisse seines Laborexperiments, in dem er in einer potentiellen primitiven Atmosphäre aus  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{H}_2$  mithilfe von elektrischen Entladungen unter anderem Aminosäuren hergestellt hat (Miller 1953). Diese Studie wurde schnell populär und gab den Anstoß für eine neue Ära der „*Origin of Life*“ Forschung (Bada, 2003). Weitere Versuche unter ähnlichen Bedingungen folgten, aus welchen bis heute viele bioessentielle organische Komponenten nachgewiesen wurden (beispielsweise weitere Aminosäuren sowie Nukleinbasen; Oró & Kamat, 1961; Parker et al. 2011). Allerdings gab es ebenfalls große Kritik an diesen Versuchen, dahingehend dass die frühe Atmosphäre eher neutral bis leicht oxidierend anstatt reduzierend gewesen sei, was die Ergebnisse dieser Studien in Frage stellte (Kasting, 1993; Shaw, 2008). Aktuellere Experimente jedoch haben gezeigt, dass die Synthese von Aminosäuren auch in einer neutralen Atmosphäre möglich wäre (Cleaves et al. 2008).

Endogene Syntheseprozesse können außerdem in hydrothermalen Systemen ablaufen. Zum Beispiel können Reaktionen auf Eisen-Nickel-Sulfid Oberflächen stattfinden, gebunden an Systeme, die in ihren Eigenschaften den heutigen schwarzen Rauchern ähneln. Diskutiert wurden hier Prozesse in semipermeablen Eisen-Sulfid-Blasen, die als potentielle katalytische Reaktionskammern dienen. In diesen könnten zum Beispiel Acetate oder Methan entstehen (Russel, 2011). Außerdem gibt es eine Reihe von Studien von Claudia Huber und Günther Wächtershäuser, die sich unter anderem mit der Entstehung von Essigsäure und Aminosäuren durch Eisen- und Nickel-katalysierte Kohlenstoff-Fixierung beschäftigen haben (Huber & Wächtershäuser 1997, 2006).

Ein weiteres Beispiel für abiotische Synthese in hydrothermalen Systemen ist die sogenannte Fischer-Tropsch-ähnliche (oder „*Fischer-Tropsch-type*“; FTT) Synthese, welche nach der folgenden vereinfachten Reaktionsgleichung abläuft:



Die ursprüngliche Fischer-Tropsch Synthese ist ein industrieller Prozess zur Herstellung künstlicher Treibstoffe und Schmieröle aus CO und H<sub>2</sub> und wurde in den 1920er Jahren von Franz Fischer und Hans Tropsch entdeckt (Fischer & Tropsch 1926, Schulz 1999). Die FTT Synthese ist für die Produktion von Kohlenwasserstoffen in heute aktiven weißen Rauchern bekannt (z.B. im „*Lost City hydrothermal field*“; Konn et al. 2015, McDermott et al. 2015). Es wird vermutet, dass dieser Prozess einen wichtigen Anteil an der Produktion bioessentieller Lipide auf der frühen Erde gehabt hat (McCollom & Seewald 2007, Konn et al. 2015).

In natürlichen Systemen ist die FTT Synthese vermutlich eng an Serpentinisierungsprozesse geknüpft. Serpentinisierung beschreibt die Reaktion von mafischen und ultramafischen Gesteinen mit Wasser unter erhöhten Temperaturen, wobei neben dem Mineral Serpentin auch H<sub>2</sub> entsteht. H<sub>2</sub> wiederum steht dann für die FTT Synthese zur Verfügung. Somit könnte Serpentinisierung möglicherweise ein Schlüsselprozess bei der Entstehung des Lebens auf der Erde und möglicherweise auch auf anderen Planeten darstellen (Sleep et al. 2004, Schulte et al. 2006;). Jedoch ist bis heute unklar, wie effektiv die FTT Synthese in natürlichen Systemen ablaufen kann und welche Mengen an organischem Material tatsächlich produziert werden können (McCollom & Seewald 2007, Konn et al. 2015).

Wie bei vielen Fragen in der „*Origin of Life*“ Forschung bleibt auch bei der Beantwortung der Frage, woher die bioessentiellen organischen Moleküle für die Entstehung des Lebens wirklich gekommen sind, noch vieles unklar. Jede experimentelle Studie zu diesem Thema hilft unser Wissen auf diesem Gebiet zu vergrößern. Jedoch ist eine eindeutige Rekonstruktion der chemischen Evolution auf der frühen Erde aus den Gesteinsarchiven aufgrund der spärlichen Vorkommen sowie dem hohen Überprägungsgrad früharchaischer oder noch älterer Gesteine schwierig, wenn nicht unmöglich.

## **2. Biologisch vs. abiotisch – FTT Experimente am Geowissenschaftlichen Zentrum Göttingen (GZG)**

Im zweiten Teil des Vortrags wurden zusammenfassend einige Studien zu FTT Reaktionen und dem Vergleich der FTT Produkte zu natürlichen Proben vorgestellt. Diese wurden in den vergangenen 3 Jahren in der Abteilung Geobiologie des GZG durchgeführt. Für die FTT Synthese wurden dazu Oxalsäure, Wasser und Montmorillonit über 3 Tage in einem Edelstahlreaktor auf 175 °C erhitzt. Die Oxalsäure zerfällt beim Erhitzen in wässriger Lösung hauptsächlich zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>, weswegen sie als Surrogat für diese Ausgangsstoffe verwendet wurde. Aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> entstehen dann organische Komponenten (siehe Formel 1), die anschließend mittels Gaschromatographie – Massenspektrometrie (GC–MS) charakterisiert wurden (Details in Mißbach et al. 2018).

Bei der FTT Synthese entstehen eine Vielzahl Kohlenwasserstoffe und sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffderivate, zum Beispiel *n*-Alkane, diverse Alkanole sowie Fettsäuren. Für die Suche nach Spuren von Leben in (z.B. archaischen) Gesteinen ist dies potentiell problematisch, da einige von diesen Komponenten als Anzeiger biologischer Aktivität, sogenannte Biosignaturen oder Biomarker, verwendet werden. Jedoch ist es möglich, die Syntheseprodukte und biologisch entstandene organische Komponenten anhand ihrer primären Verteilungsmuster im Chromatogramm voneinander zu unterscheiden. So können biologische Produkte (z.B. *n*-Alkane) ungleichmäßige Verteilungen oder Bevorzugungen der einzelnen Homologe aufweisen („*odd-over-even preferences*“), während die abiotischen Syntheseprodukte immer gleichmäßige Verteilungen zeigen (Mißbach et al. 2018).

Solche Verteilungen können sich allerdings durch erhöhte Temperaturen verändern. In Reifungsexperimenten wurde gezeigt, dass aus ungleichmäßigen (biologischen) Verteilungsmustern bei Temperaturen >400 °C gleichmäßige Verteilungsmuster entstehen, bzw. manche Biomarker komplett zerstört werden können (Mißbach et al. 2016, 2018). Dies kann dazu führen, dass abiotische Syntheseprodukte und organisches Material biologischen Ursprungs nicht mehr voneinander unterscheidbar sind. Dennoch konnten in archaischen Gesteinen biologische Signaturen nachgewiesen werden (Duda et al. 2018). Voraussetzung dafür ist, dass diese Gesteine nicht zu hohen Temperaturen ausgesetzt waren. Das Vorliegen der Organik in Form von Kerogen sowie eine Einbettung in eine dichte Gesteinsmatrix steigern außerdem das Erhaltungspotential von Biomarkern (Brocks & Summons 2004, Killops & Killops 2005).

Diese Studien zur Unterscheidung von abiotischen und biologischen Signaturen in Gesteinen sind nicht nur für die Suche nach frühem Leben auf der Erde relevant, sondern auch für astrobiologische Untersuchungen anderer Planeten bzw. planetarer Körper in unserem Sonnensystem. Die ExoMars Rover Mission (Start 2020) zum Beispiel wird nach (organischen) Biosignaturen auf dem Mars suchen, unter anderem mithilfe des „*Mars Organic Molecule Analyzer*“ (MOMA) Instruments (Goesmann et al. 2017, Vago et al. 2017). Dieses Instrument ist in der Lage, die oben genannten biologischen Verteilungsmuster aufzulösen. Analogstudien helfen uns dabei, die Dateninterpretation dieser und anderer zukünftiger Missionen zu erleichtern.

## Literatur

ALTWEGG, K., H. BALSIGER, A. BAR-NUN, J.-J. BERTHELIER, A. BIELER, P. BOCHSLER, C. BRIOIS, U. CALMONTE et al. (2016): Prebiotic chemicals – amino acid and phosphorus – in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. – *Science Advances* 2: e1600285.

BADA, J.L. (2004): How life began on Earth: a status report. – *Earth and Plan. Sci. Letters* **226**: 1–15.

BADA, J.L. & A. LAZCANO (2003): Prebiotic soup – revisiting the miller experiment. – *Science* **300**: 745–746.

BROCKS, J.J. & R.E. SUMMONS (2004): Biomarkers for Early Life. In W.H. SCHLESINGER (Ed.), *Biogeochemistry*. Elsevier, Oxford, pp. 63–115.

CHYBA, C. & C. SAGAN (1992): Endogenous production, exogenous delivery and impact-shock synthesis of organic molecules: an inventory for the origins of life. – *Nature* **355**: 125–132.

CLEAVES, H.J., J.H. CHALMERS, A. LAZCANO, S.L. MILLER & J.L. BADA (2008): A reassessment of prebiotic organic synthesis in neutral planetary atmospheres. – *Origins of Life and Evolution of Biospheres* **38**: 105–115.

DASS, A. V., K. HICKMAN-LEWIS, A. BRACK, T.P. KEE & F. WESTALL (2016): Stochastic prebiotic chemistry within realistic geological systems. – *Chemistry Select* **1**: 4906–4926.

DUDA, J.-P., V. THIEL, T. BAUERSACHS, H. MISSBACH, M. REINHARDT, N. SCHÄFER, M.J. VAN KRANENDONK & J. REITNER (2018): Ideas and perspectives: hydrothermally driven redistribution and sequestration of early Archaeal biomass—the “hydrothermal pump hypothesis”. – *Biogeosciences* **15**: 1535–1548.

EHRENFREUND, P. & S.B. CHARNLEY (2000): Organic Molecules in the Interstellar Medium, Comets, and Meteorites: A Voyage from Dark Clouds to the Early Earth. – *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **38**: 427–483.

FISCHER, F. & H. TROPSCH (1926): Über die direkte Synthese von Erdöl-Kohlenwasserstoffen bei gewöhnlichem Druck (Erste Mitteilung). – *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft (A and B Series)* **59**: 830–831.

FOLLMANN, H. & C. BROWNSON (2009): Darwin’s warm little pond revisited: from molecules to the origin of life. – *Naturwissenschaften* **96**: 1265–1292.

GOESMANN, F., H. ROSENBAUER, J.H. BREDEHÖFT, M. CABANE, P. EHRENFREUND, T. GAUTIER, C. GIRI, H. KRÜGER et al. (2015): Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry. – *Science* **349**: aab0689.

GOESMANN, F., W.B. BRINCKERHOFF, F. RAULIN, W. GOETZ, R.M. DANELL, S.A. GETTY, S. SILJESTRÖM, H. MISSBACH et al. (2017): The Mars Organic Molecule Analyzer (MOMA) instrument: characterization of organic material in martian sediments. – *Astrobiology* **17**: 655–685.

HUBER, C. & G. WÄCHTERSCHÄUSER (1997): Activated acetic acid by carbon fixation on (Fe, Ni) S under primordial conditions. – *Science* **276**: 245–247.

HUBER, C. & G. WÄCHTERSCHÄUSER (2006):  $\alpha$ -Hydroxy and  $\alpha$ -amino acids under possible Hadean, volcanic origin-of-life conditions. – *Science* **314**: 630–632.

KASTING, J.F. (1993): Earth's early atmosphere. – *Science* **259**: 920–926.

KILLOPS, S.D. & V.J. KILLOPS (2005): Introduction to organic geochemistry. 2. edition, Blackwell Publishing Ltd, Oxford.

KONN, C., J.L. CHARLOU, N.G. HOLM & O. MOUSIS (2015): The production of methane, hydrogen, and organic compounds in ultramafic-hosted hydrothermal vents of the Mid-Atlantic Ridge. – *Astrobiology* **15**: 381–399.

MCCOLLOM, T.M. & J.S. SEEWALD (2007): Abiotic synthesis of organic compounds in deep-sea hydrothermal environments. – *Chemical Reviews* **107**: 382–401.

MCDERMOTT, J.M., J.S. SEEWALD, C.R. GERMAN & S.P. SYLVA (2015): Pathways for abiotic organic synthesis at submarine hydrothermal fields. – *Proceedings of the National Academy of Sciences* **112**: 7668–7672.

MILLER, S.L. (1953): A production of amino acids under possible primitive earth conditions. – *Science* **117**: 528–529.

MISSBACH, H., J.P. DUDA, N.K. LÜNSDORF, B.C. SCHMIDT & V. THIEL (2016): Testing the preservation of biomarkers during experimental maturation of an immature kerogen. – *International Journal of Astrobiology* **15**: 165–175.

MISSBACH, H., B.C. SCHMIDT, J.P. DUDA, N.K. LÜNSDORF, W. GOETZ & V. THIEL (2018): Assessing the diversity of lipids formed via Fischer-Tropsch-type reactions. – *Organic Geochemistry*, **119**: 110–121.

ORÓ, J. & S.S. KAMAT (1961): Amino-acid synthesis from hydrogen cyanide under possible primitive earth conditions. – *Nature* **190**: 442–443.

PARKER, E.T., H.J. CLEAVES, J.P. DWORKIN, D.P. GLAVIN, M. CALLAHAN, A. AUBREY, A. LAZCANO, & J.L. BADA (2011): Primordial synthesis of amines and amino acids in a 1958 Miller H<sub>2</sub>S-rich spark discharge experiment. – *Proceedings of the National Academy of Sciences* **108**: 5526–5531.

RUF, A., L. D'HENDECOURT & P. SCHMITT-KOPPLIN (2018): Data-Driven Astrochemistry: One Step Further within the Origin of Life Puzzle. – *Life* **8**: 18.

RUSSELL, M.J. (2011): Origin of Life. In J. Reitner and V. Thiel (Eds.), *Encyclopedia of Geobiology*. Springer Science & Business Media, Dordrecht, pp. 701–716.

SCHULTE, M., D. BLAKE, T. HOEHLER & T.M. MCCOLLOM (2006): Serpentinization and its implications for life on the early Earth and Mars. – *Astrobiology* **6**: 364–376.

SCHULZ, H. (1999): Short history and present trends of Fischer-Tropsch synthesis. – *Applied Catalysis A: General* **186**: 3–12.

SHAW, G.H. (2008): Earth's atmosphere – Hadean to early Proterozoic. – *Chemie der Erde*, **68**: 235–264.

SLEEP, N.H., A. MEIBOM, T. FRIDRIKSSON, R.G. COLEMAN & D.K. BIRD (2004): H<sub>2</sub>-rich fluids from serpentinization: geochemical and biotic implications. – *Proceedings of the National Academy of Sciences* **101**: 12818–12823.

VAGO, J.L., F. WESTALL, A.J. COATES, R. JAUMANN, O. KORABLEV, V. CIARLETTI, I. MITROFANOV, J.-L. JOSSET et al. (2017): Habitability on early Mars and the search for biosignatures with the ExoMars Rover. – *Astrobiology* **17**: 471–510.